

М.И.БАРАНОВ, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Н.Н.ИГНАТЕНКО, канд. техн. наук, зав. сектором, НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ ВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОДНИКОВ ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ СРАБАТЫВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ РАЗРЯДНИКОВ ЗАМЫКАТЕЛЯ НАГРУЗКИ В ГЕНЕРАТОРЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА МОЛНИИ

Наведено розрахункові і експериментальні результати застосування в схемі замикача *RL*-навантаження генератора великих імпульсних струмів блискавки на напругу до 1,3 МВ електрично вибухаючих провідників.

Are the calculation and experimental results of application in the chart of switchboard *RL*-loading generator larimpulsive the currents of lightning on voltage to 1,3 MV of electric bursting explorers.

Введение. В настоящее время в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» разработан и создан генератор больших импульсных токов молнии (ГБИТМ), содержащий мощный емкостной накопитель энергии (ЕНЭ) и два параллельно работающих замыкателя *RL*-нагрузки с двумя неуправляемыми воздушными стержневыми разрядниками атмосферного давления и двумя корректирующими емкостями $C_{к1} = C_{к2}$ [1,2]. Данный ГБИТМ предназначен для проведения испытаний на молниестойкость технических объектов в соответствии с требованиями ГОСТ 30585-98 [3], электрические параметры которых по активному сопротивлению не превышают 0,1 Ом, а по индуктивности – 14 мкГн [2]. К определенным недостаткам в работе указанного генератора импульсных токов молнии следует отнести недостаточную стабильность момента срабатывания неуправляемых воздушных стержневых разрядников его замыкателей *RL*-нагрузки при выходном рабочем напряжении ЕНЭ от 0,75 до 1,3 МВ. С целью повышения эффективности работы неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей *RL*-нагрузки в ГБИТМ авторами было предложено использовать импульсное перенапряжение, возникающее в разрядной цепи ЕНЭ при электрическом взрыве в ней металлического проводника [4–6]. Схема замещения генератора импульсных токов молнии с электрически взрывающимися проводниками (ЭВП) представлена на рис. 1. Работает данный генератор следующим образом. При срабатывании отсекающего разрядника P_1 электрическая емкость накопителя C_r генератора начинает разряжаться на активно-индуктивную нагрузку, формируя в ней фронт аperiодического импульса тока $i_n(t)$ молнии. В момент достижения током $i_n(t)$ своего максимального значения происходит электрический взрыв тонкого медного ЭВП. Импульсное перенапряжение, возникающее на ЭВП, воздействует на воздушные разрядники замыкателей нагрузки P_2 и P_3 , что и

определяет их гарантированное срабатывание в нужный момент времени. При этом в RL -нагрузке генератора ГБИТМ формируется спад аperiodического импульса тока молнии. Необходимо отметить, что для уменьшения шунтирующего влияния ЭВП на амплитуду импульсного тока молнии $i_n(t)$ в составе цепи ЭВП разработанного ГБИТМ был применен токоограничивающий резистор R_T [6]. Практический интерес при использовании такого ГБИТМ представляет техническая задача, связанная с определением длины $l_{ВП}$ и сечения $S_{ВП}$ используемого в нем ЭВП, а также активного сопротивления токоограничивающего резистора R_T для всего диапазона изменения рабочего напряжения (от 0,75 до 1,3 МВ) ГБИТМ. Поэтому разработка инженерной методики расчета электрических параметров цепи с ЭВП и экспериментальная проверка работоспособности указанного генератора ГБИТМ (см. рис. 1) в указанном диапазоне его выходного рабочего напряжения (0,75–1,3 МВ) и является целью данной работы.

1. Расчет длины, сечения ЭВП и активного сопротивления токоограничивающего резистора в генераторе ГБИТМ. При решении поставленной задачи будем исходить из того, что электрический взрыв тонкого проводника в цепи ГБИТМ должен происходить в момент времени t_6 , близкий к моменту достижения током нагрузки $i_n(t)$ своего максимального значения. Зная диаметр $d_{ВП}$ ЭВП и зная момент времени t_6 , можно определить максимальное значение I_{6nm} тока $i_{ВП}(t)$ в цепи ГБИТМ, вызывающее электровзрыв тонкого проводника. Согласно [7–9] для величины I_{6nm} приближенно имеем:

$$I_{6nm} = S_{ВП} (0,07\gamma_0 W_c / t_6)^{1/2}, \quad (1)$$

где W_c – среднее значение удельной энергии взрывообразного разрушения проводника (для медного проводника $W_c = 3,69 \cdot 10^{10}$ Дж/м³ [8]); γ_0 – удельная электропроводность материала проводника до воздействия на него тока (для меди при температуре воздушной среды $T_0 = 20$ °С $\gamma_0 = 5,81 \cdot 10^7$ См/м [8]).

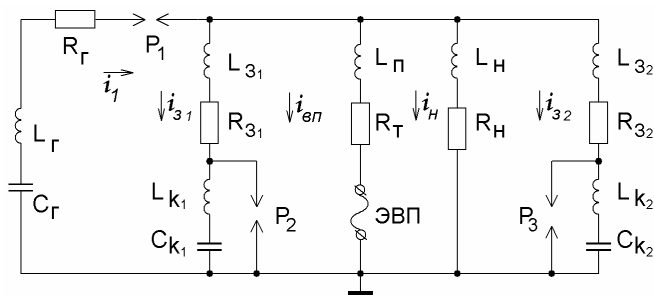


Рисунок 1 – Схема замещения генератора ГБИТМ с использованием неуправляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL -нагрузки, корректирующих емкостей $C_{K1} = C_{K2}$, электрической цепи с ЭВП и резистором R_T

Проведем далее оценочный расчет значения суммы активных сопротивлений $(R_T + R_{ВП})$ в разрядном контуре исследуемого генератора ГБИТМ. При этом воспользуемся следующим приближенным выражением:

$$(R_T + R_{ВП}) = a_1 (I_{нм}^2 I_{внм}^2 L_n^2 - L_{П}^2)^{0,5}, \quad (2)$$

где $R_{ВП}$ – активное сопротивление ЭВП в момент времени, непосредственно предшествующий его электровзрыву; a_1 – круговая частота в схеме генератора ГБИТМ без использования цепи с ЭВП; $L_{П}$ – полная индуктивность цепи с ЭВП; $I_{нм}$ – максимальное значение импульсного тока $i_n(t)$ в RL -нагрузке рассматриваемого генератора импульсного тока молнии.

В [10] было показано, что величину активного сопротивления тонкого медного ЭВП в момент времени, непосредственно предшествующий его электровзрыву, можно оценить из следующего приближенного выражения:

$$R_{ВП} = \rho_{\kappa} I_{ВП} S_{ВП}^{-1}, \quad (3)$$

где $\rho_{\kappa} = [9,1 + 9 \cdot 10^{-3}(T_{\kappa} + 273,16)] \cdot 10^{-8} = 34,84 \cdot 10^{-8}$ Ом \cdot м – удельное электрическое сопротивление меди при температуре ее кипения, равной $T_{\kappa} = 2587$ °C [11].

Применив (3), определим активное сопротивление медного проводника, имеющего диаметр $d_{ВП} = 0,2$ мм и длину $l_{ВП} = 1$ м в момент времени t_6 , практически соответствующий его электровзрыву. Для указанных геометрических размеров активное сопротивление $R_{ВП}$ будет приближенно равным 11,09 Ом. Используя (1)–(3), проведем оценочные расчеты искомых электрических параметров в исследуемом ГБИТМ, в составе которого в качестве ЕНЭ применен накопитель генератора ГИН-3 ($C_G = 0,08$ мкФ, $L_n = 35$ мкГн, $R_G = 2$ Ом). Цепи замыкателей и RL -нагрузка в данном генераторе токов молнии имеют следующие электрические параметры: $R_{31} = R_{32} = 0,1$ Ом; $L_{31} = L_{32} = 5$ мкГн; $L_{\kappa 1} = L_{\kappa 2} = 5$ мкГн; $C_{\kappa 1} = C_{\kappa 2} = 20,83$ нФ; $R_n = 0,1$ Ом; $L_n = 14$ мкГн; $a_1 = 0,4927 \cdot 10^6$ с⁻¹. При отсутствии цепи ЭВП и рабочем напряжении ГИН-3 $U_0 = 700$ кВ максимальное расчетное значение импульсного тока $i_n(t)$ в RL -нагрузке данного ГБИТМ будет равным $I_{нм} = 35,87$ кА. Согласно (1) расчетная амплитуда импульсного тока $i_{внм}(t)$, необходимая для электровзрыва выбранного медного проводника диаметром $d_{ВП} = 0,2$ мм в момент времени $t_6 = 3,7$ мкс, будет равна $I_{внм} = 6,27$ кА. Задав индуктивность $L_n = 12$ мкГн, из (2) находим, что сумма активных сопротивлений $(R_T + R_{ВП})$ в разрядном контуре генератора ГБИТМ будет приближенно равна 33,6 Ом. Уточняющие расчеты на ПЭВМ показывают, что при амплитуде тока $I_{внм} = 6,27$ кА численное значение суммы активных сопротивлений $(R_T + R_{ВП})$ в цепи ЭВП будет равно 27,35 Ом. Полагая $R_T = 24$ Ом, из (3) находим, что электрически взрываеваемый медный проводник диаметром $d_{ВП} = 0,2$ мм должен иметь расчетную длину, приближенно равную $l_{ВП} = 0,3$ м.

Применив предложенную методику, проведем расчет длины ЭВП и величины активного сопротивления R_T в генераторе ГБИТМ (см. рис.1) при разных

рабочих напряжениях его ЕНЭ, равных: $U_{01} = 750$ кВ, $U_{02} = 1$ МВ, $U_0 = 1,3$ МВ. Длину $S_2 = S_3$ разрядных промежутков неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателя RL -нагрузки определим в нашем случае по методике, приведенной в [12]. Данные этого расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные параметры цепи с ЭВП и R_T в генераторе ГБИТМ

Рабочее напряжение ГИН-3 U_0 , кВ	Амплитуда тока в нагрузке $I_{нт}$, кА	Длина разрядного промежутка $S_2 = S_3$, см	Длина ЭВП $l_{вп}$, см	Амплитуда тока в цепи ЭВП $I_{внт}$, кА	Резистор R_T , Ом
750	32,92	20,8	49	6,27	24
1000	45,23	30,7	31,6	6,27	40
1300	60,57	41,6	28	6,27	56

2. Результаты экспериментального исследования электромагнитных процессов в разрядной цепи генератора ГБИТМ. Проверка полученных выше расчетных данных проводилась на экспериментальной базе НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ», где и был создан генератор ГБИТМ с применением ЭВП в его разрядной цепи. В состав исследуемого ГБИТМ входили: генератор ГИН-3, два замыкателя RL -нагрузки с неуправляемыми воздушными стержневыми разрядниками P_2 и P_3 , параллельно которым были включены емкости $C_{к1} = C_{к2} = 20,83$ нФ и активно-индуктивная нагрузка ($R_n = 0,1$ Ом; $L_n = 14$ мкГн). Электрическая цепь, содержащая ЭВП и токоограничивающий резистор R_T , была подключена параллельно RL -нагрузке. Токоограничивающий резистор R_T был выполнен в виде последовательно соединенных секций из резисторов типа ТВО–60–24 Ом, каждая из которых была выполнена из шести параллельно соединенных аналогичных резисторов суммарным активным сопротивлением в 4 Ом. Указанная секционная конструкция резистора R_T позволяла при проведении экспериментов выбирать его значение согласно данным, приведенным в табл. 1. В генераторе ГБИТМ индуктивность цепи подвода к ЭВП была определена цифровым измерителем индуктивности типа Е7-8 и принята равной $L_{п} = 12$ мкГн. Эксперименты с указанным ГБИТМ были проведены при следующих значениях рабочего напряжения генератора ГИН-3: $U_{01} = 750$ кВ, $U_{02} = 1000$ кВ и $U_{03} = 1300$ кВ. В качестве ЭВП был выбран медный провод марки ПЭВ-2 с наружным диаметром $d_{вп} = 0,2$ мм. Межэлектродное расстояние $S_2 = S_3$ разрядников P_2 и P_3 было установлено согласно расчетным данным, приведенным в табл. 1. В процессе проведения опытных работ на генераторе ГБИТМ изменялась длина ЭВП $l_{вп}$ и длины разрядных промежутков $S_2 = S_3$ таким образом, чтобы пробой неуправляемых воздушных стержневых разрядников замыкателей RL -нагрузки происходил в момент времени, примерно равный $t_e = (3,5–3,8)$ мкс. Результаты экспери-

ментального исследования работы генератора ГБИТМ с использованием в цепи ЭВП электрически взрывааемых тонких медных проводников приведены ниже в табл. 2.

Таблица 2. –Результаты экспериментального исследования работы генератора ГБИТМ с электрической цепью ЭВП и резистором R_T

Рабочее напряжение ГИН-3 U_0 , кВ	Амплитуда тока в нагрузке I_{nm} , кА	Длина разрядного промежутка $S_2 = S_3$, см	Длина ЭВП $l_{ВП}$, см	Амплитуда тока в цепи ЭВП $I_{вмп}$, кА	Резистор R_T , Ом
750	31,5	21,2	55	6,27	24
1000	44,6	31	32	6,27	40
1300	60	41,3	30	6,27	56

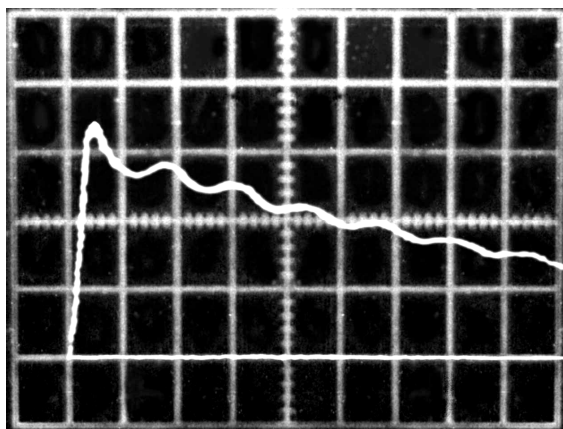


Рисунок 2 – Осциллограмма импульсного тока молнии $i_n(t)$ в RL -нагрузке генератора ГБИТМ при использовании в его разрядной цепи ЭВП и резистора R_T (масштаб по амплитуде – 9,26 кА/дел; масштаб по времени – 10 мкс/дел)

На рис. 2 представлена осциллограмма импульсного тока $i_n(t)$ в RL -нагрузке рассматриваемого генератора ГБИТМ. При этом измерение тока $i_n(t)$ в нагрузке созданного ГБИТМ было проведено при рабочем напряжении генератора ГИН-3, равном $U_{01} = 750$ кВ. Согласно рис. 2 импульсный ток $i_n(t)$ достигает своего амплитудного значения $I_{nm} = 32$ кА примерно в момент времени $t_{nm} = 3,3$ мкс. При этом его длительность, взятая на уровне половины амплитуды тока I_{nm} , равна около $\tau_{0,5} = 60$ мкс. Амплитудно-временные параметры сформированного в RL -нагрузке ГБИТМ соответствуют испытаниям по 1-ой степени жесткости согласно ГОСТ 30585-98 [3]. Отметим, что применение ЭВП в разрядном контуре ГБИТМ повышает стабильность работы неуправляемых воздушных стержневых разрядников P_2 и P_3 замыкателей RL -

нагрузки. Однако, при этом снижается электрический КПД η_p разрядной цепи данного ГБИТМ. Численное значение величины η_p в нашем случае оказывается примерно равным $\eta_p = 0,32$ (без ЭВП значение η_p составляет около 0,44).

Выводы

- 1 Показано, что усовершенствованный генератор ГБИТМ на рабочее напряжение до 1,3 МВ с применением цепи ЭВП может надежно формировать испытательные импульсы тока молнии в крупногабаритных объектах.
- 2 Предложена методика выбора электрических параметров ЭВП (длины и его сечения) и токоограничивающего резистора в созданном генераторе импульсного тока молнии. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность данной методики и возможность ее применения при разработке генераторов ГБИТМ мегавольтного диапазона на импульсные токи до 100 кА.

Список литературы: 1. Патент України №63747, МКІ НОЗК3/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. №8, 15.08.2005. – 4 с. 2. Баранов М.І., Ігнатенко Н.Н. Повышение энергетической эффективности разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с мощными емкостными накопителями энергии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 49. – С. 3–14. 3. Межгосударственный ГОСТ 30585-98. Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний. – Киев: Госстандарт Украины, 1998. – 27 с. 4. Патент України № 6279, МКІ НОЗК3/53. Генератор імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. №5, 16.05.2005. – 4 с. 5. Патент України № 8362, МКІ НОЗК3/53. Генератор великих імпульсних струмів // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 8, 15.08.2005. – 4 с. 6. Патент України № 12376, МПК НОЗК3/53. Установка для отримання імпульсного струму блискавки // Баранов М.І., Ігнатенко М.М., Колобовський А.К. – Опубл. Бюл. № 2, 15.02.2006. – 4 с. 7. Баранов М.И. Упрощенная математическая модель электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 3. – С. 59–64. 8. Баранов М.И., Ігнатенко Н.Н., Колобовський А.К. Экспериментально-аналитическое определение удельной энергии электротеплового разрушения медных проводников под воздействием больших импульсных токов // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 2. – С. 70–73. 9. Баранов М.И. Приближенный расчет времени до электровзрыва проводника под воздействием больших импульсных синусоидальных токов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 5. – С. 3–7. 10. Столович Н.Н., Милицкая Н.С. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов. – Минск: Наука и техника, 1975. – 160 с. 11. Баранов М.И., Ігнатенко Н.Н. Приближенный расчет времени электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 14–18. 12. Ігнатенко Н.Н. Выбор длины воздушных промежутков разрядников замыкателей нагрузки в кругбар-генераторах импульсного тока молнии // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 39. – С. 64–69.

Поступила в редколлегию 19.03.2010